

Optimasi Alokasi Kapal ke Dermaga pada PT XYZ di Pelabuhan Panjang Menggunakan Metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA) untuk Meminimalkan Total Biaya Operasional Kapal

1st Yoara Damar Puspasari
Industrial Engineering Faculty
Telkom University

Bandung, Indonesia
yoaradamarp@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Erlangga Bayu Setyawan
Industrial Engineering Faculty
Telkom University

Bandung, Indonesia
erlanggabs@telkomuniversity.ac.id

3rd Putu Giri Artha Kusuma
Industrial Engineering Faculty
Telkom University

Bandung, Indonesia
putugirikusuma@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — PT XYZ sebagai operator di Pelabuhan Panjang menghadapi permasalahan keterlambatan penyandaran kapal yang berdampak langsung pada peningkatan biaya operasional, seperti biaya tunggu, penanganan, dan penalti. Permasalahan ini timbul akibat alokasi dermaga yang belum optimal, terbatasnya fasilitas pelabuhan, serta faktor eksternal seperti cuaca dan keterbatasan kapal pemandu. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan alokasi dermaga dengan meminimalkan total biaya operasional kapal menggunakan pendekatan *Cuckoo Search Algorithm* (CSA). Model optimasi dirancang dalam bentuk pemrograman integer dengan mempertimbangkan berbagai pembatas seperti panjang dermaga, waktu aman antar kapal, slot dermaga, dan preferensi posisi sandar kapal. CSA dipilih karena kemampuannya dalam menangani ruang pencarian solusi yang besar dan kompleks secara efisien. Hasil simulasi terhadap 91 kapal selama periode 10 hari menunjukkan bahwa penerapan CSA mampu menekan biaya tunggu dari Rp878 juta menjadi Rp0 dan mengurangi biaya penalti hingga 74%. Secara keseluruhan, total biaya operasional kapal dapat ditekan sebesar 40–60%. Penelitian ini menunjukkan bahwa CSA efektif dalam meningkatkan efisiensi operasional dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data di pelabuhan.

Kata kunci— Alokasi dermaga, *Cuckoo Search Algorithm*, Optimasi Biaya, Pelabuhan, Penjadwalan Kapal

I. PENDAHULUAN

Pelabuhan memiliki peranan vital dalam mendukung kelancaran distribusi logistik, khususnya dalam penghubung moda transportasi laut dan darat. Sebagai negara kepulauan, Indonesia mengandalkan pelabuhan sebagai simpul logistik strategis untuk perdagangan domestik maupun internasional. Salah satu pelabuhan yang memiliki peranan penting adalah Pelabuhan Panjang di Provinsi Lampung. Pelabuhan ini melayani aktivitas bongkar muat kapal domestik maupun internasional dan menjadi bagian krusial dalam rantai pasok wilayah Sumatera dan sekitarnya.

PT XYZ, sebagai perusahaan operator pelabuhan di Pelabuhan Panjang, bertanggung jawab terhadap kelancaran penyandaran kapal dan pengaturan alokasi dermaga. Dalam praktiknya, ditemukan permasalahan signifikan berupa keterlambatan penyandaran kapal, yang berdampak langsung terhadap peningkatan biaya operasional seperti biaya tunggu,

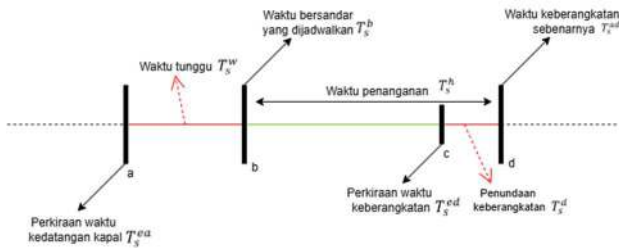
biaya penanganan, dan biaya penalti. Berdasarkan data historis, dari 91 kapal yang beroperasi selama 10 hari, sebanyak 20% kapal mengalami keterlambatan penyandaran. Persentase ini menunjukkan deviasi yang cukup besar dari target performa perusahaan, yaitu keterlambatan maksimal hanya 5%.

Salah satu penyebab utama dari permasalahan ini adalah alokasi dermaga yang belum optimal. Kondisi tersebut diperparah oleh keterbatasan fasilitas pelabuhan, kepadatan antrian kapal, serta faktor eksternal seperti cuaca buruk atau kurangnya kapal pemandu. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan sistematis yang mampu mengoptimalkan penjadwalan dan alokasi dermaga secara efisien dan adaptif. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA), sebuah algoritma metaheuristik yang diadopsi dari perilaku reproduksi burung *cuckoo*, dalam proses optimasi alokasi dermaga. *Cuckoo Search Algorithm* dipilih karena kemampuannya dalam menyelesaikan masalah optimasi *non*-linier dan kompleks dengan ruang solusi yang luas. Dengan mengintegrasikan parameter operasional dermaga, waktu kedatangan kapal, serta biaya operasional ke dalam model *Cuckoo Search Algorithm* (CSA), diharapkan diperoleh solusi alokasi dermaga yang dapat meminimalkan total biaya operasional kapal secara menyeluruh.



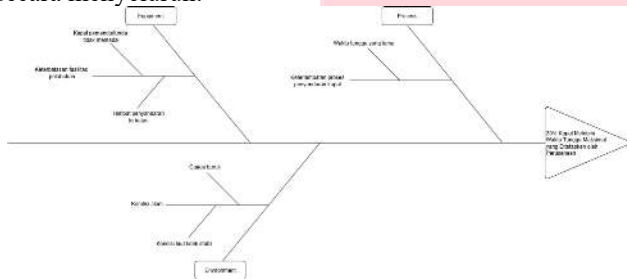
GAMBAR 1

Salah satu penyebab utama dari permasalahan ini adalah alokasi dermaga yang belum optimal. Kondisi tersebut diperparah oleh keterbatasan fasilitas pelabuhan, kepadatan antrian kapal, serta faktor eksternal seperti cuaca buruk atau kurangnya kapal pemandu. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan sistematis yang mampu mengoptimalkan penjadwalan dan alokasi dermaga secara efisien dan adaptif.



GAMBAR 2

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA), sebuah algoritma metaheuristik yang diadopsi dari perilaku reproduksi burung *cuckoo*, dalam proses optimasi alokasi dermaga. CSA dipilih karena kemampuannya dalam menyelesaikan masalah optimasi nonlinier dan kompleks dengan ruang solusi yang luas. Dengan mengintegrasikan parameter operasional dermaga, waktu kedatangan kapal, serta biaya operasional ke dalam model CSA, diharapkan diperoleh solusi alokasi dermaga yang dapat meminimalkan total biaya operasional kapal secara menyeluruh.



GAMBAR 3

II. KAJIAN TEORI

A. Pelabuhan dan Proses Penyandaran Kapal
 Pelabuhan merupakan simpul utama dalam jaringan logistik laut dan darat yang menyediakan fasilitas untuk aktivitas bongkar muat barang serta naik-turunnya penumpang. Menurut Peraturan Menteri Perhubungan RI No. PM 51 Tahun 2015, pelabuhan memiliki fungsi strategis dalam mendukung konektivitas antar moda, pertumbuhan ekonomi, serta sebagai pusat distribusi dan konsolidasi barang. Aktivitas utama di pelabuhan meliputi kedatangan kapal, pemanduan, penyandaran, bongkar muat, hingga keberangkatan kapal. Efisiensi dalam proses penyandaran sangat dipengaruhi oleh alokasi dermaga, waktu tunggu kapal, dan kapasitas fasilitas pelabuhan.

- B. Biaya Operasional Kapal**
 Biaya operasional yang timbul selama proses penyandaran terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:
1. Biaya tunggu (*waiting cost*): biaya yang timbul akibat kapal harus menunggu giliran sandar.
 2. Biaya penanganan (*handling cost*): biaya untuk proses bongkar muat yang dihitung berdasarkan durasi dan produktivitas alat.
 3. Biaya penalti: denda yang dikenakan bila kapal terlambat sandar atau menempati lokasi sandar yang tidak sesuai.

Ketiga komponen ini merupakan elemen penting dalam perhitungan total biaya yang menjadi fungsi objektif dalam proses optimasi.

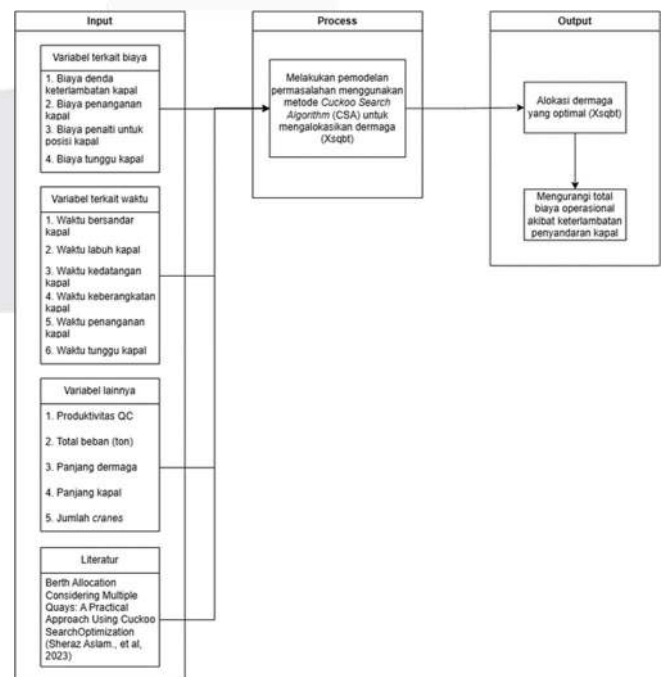
C. Cuckoo Search Algorithm (CSA)
Cuckoo Search Algorithm (CSA) adalah algoritma metaheuristik yang dikembangkan oleh Yang dan Deb (2009), terinspirasi dari perilaku reproduksi burung *cuckoo*. Algoritma ini mengadopsi strategi parasitisme sarang dan menerapkan mekanisme *Levy flight* untuk menjelajahi ruang solusi secara luas dan efisien. Tiga prinsip utama *Cuckoo Search Algorithm* adalah:

- (1) setiap *cuckoo* meletakkan satu telur dalam satu sarang secara acak;
- (2) solusi terbaik disimpan untuk generasi berikutnya;
- (3) sebagian sarang digantikan berdasarkan probabilitas penemuan. *Cuckoo Search Algorithm* terbukti efektif dalam menyelesaikan berbagai masalah penjadwalan, alokasi, dan optimasi sumber daya karena sifatnya yang sederhana namun eksploratif.

D. Optimasi Alokasi Dermaga
 Permasalahan alokasi dermaga termasuk ke dalam MQ-BAP problem, yang melibatkan penjadwalan kapal terhadap slot dermaga dengan mempertimbangkan waktu kedatangan, durasi penanganan, panjang kapal, panjang dermaga, dan posisi optimal. Tujuan utamanya adalah meminimalkan total biaya operasional dan memaksimalkan utilisasi fasilitas pelabuhan. Dalam konteks penelitian ini, CSA digunakan untuk mengoptimalkan fungsi objektif berupa minimisasi biaya tunggu, biaya penanganan, dan penalti keterlambatan, dengan mempertimbangkan constraint seperti panjang dermaga, slot aktif, dan waktu antar kapal.

III. METODE

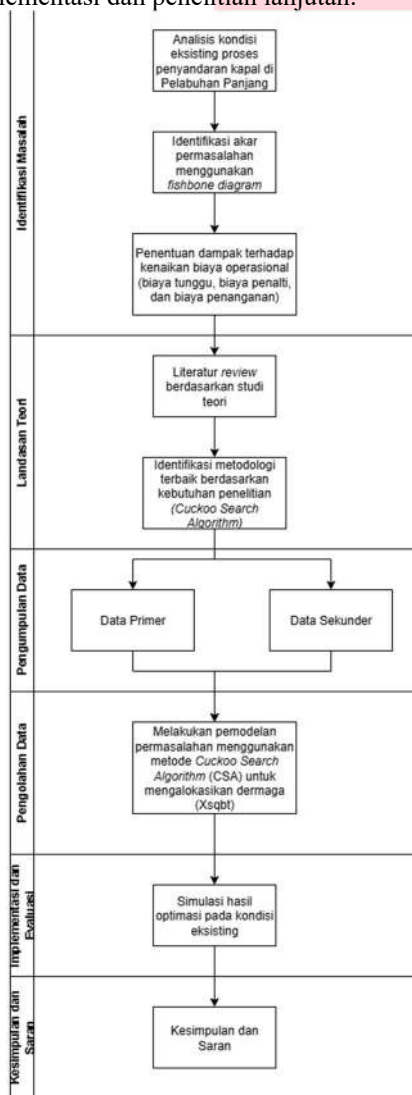
A. Kerangka Berpikir
 Kerangka berpikir dalam penelitian ini menggambarkan alur pemodelan permasalahan optimasi alokasi dermaga menggunakan metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA). Berikut merupakan kerangka berpikir yang digunakan dalam penelitian ini



GAMBAR 4

B. Sistematika Penyelesaian Masalah

Sistematika penyelesaian masalah dalam penelitian ini diawali dengan identifikasi permasalahan melalui analisis kondisi aktual proses penyandaran kapal di Pelabuhan Panjang dan penelusuran akar masalah menggunakan diagram fishbone untuk mengidentifikasi faktor penyebab serta dampaknya, seperti biaya tunggu dan inefisiensi operasional. Kajian literatur dilakukan untuk memperkuat landasan teoritis dan menetapkan Cuckoo Search Algorithm (CSA) sebagai metode optimalisasi alokasi dermaga. Data yang digunakan mencakup data primer (observasi dan wawancara) serta data sekunder dari dokumen pendukung. Data tersebut diolah menggunakan CSA untuk memperoleh solusi alokasi dengan biaya minimum, kemudian dievaluasi melalui simulasi guna menilai efektivitasnya. Tahap akhir mencakup penyusunan kesimpulan dan pemberian saran untuk implementasi dan penelitian lanjutan.



GAMBAR 5

C. Pengumpulan Data

Data dan parameter dibutuhkan dalam pengolahan data sebagai inputan yang akan diproses dalam perhitungan menggunakan pendekatan Cuckoo Search Algorithm (CSA). Data tersebut di antaranya meliputi jadwal kedatangan kapal, waktu berlabuh kapal di dermaga, kapasitas dan jumlah dermaga yang tersedia, estimasi waktu tunggu, serta biaya keterlambatan penyandaran kapal yang dihitung dan diasumsikan berdasarkan kebijakan operasional di PT XYZ Pelabuhan Panjang.

D. Model Cuckoo Search Algorithm yang Digunakan

- Algoritma CSA bekerja dengan prinsip sebagai berikut:
1. Inisialisasi solusi awal: membangkitkan sejumlah solusi (nest) berupa alokasi kapal terhadap slot dermaga tertentu.
 2. Evaluasi fitness: menghitung total biaya dari solusi menggunakan fungsi objektif yang mempertimbangkan biaya tunggu, penalti, dan penanganan.
 3. Levy Flight: menghasilkan solusi baru dengan cara eksplorasi global melalui distribusi Lévy, yaitu mutasi posisi kapal terhadap slot dan waktu.
 4. Seleksi alami: solusi terbaik dari generasi sebelumnya dipertahankan, sedangkan sebagian solusi diganti jika ditemukan solusi yang lebih baik.
 5. Discovery probability (pa): parameter probabilitas penggantian sarang berdasarkan kemampuan burung inang mendeteksi telur asing.
 6. Iterasi: proses berulang dilakukan hingga mencapai kondisi konvergen atau jumlah iterasi maksimum.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data-Data Kapal

Dalam pengolahan data sebagai inputan yang akan diproses dalam perhitungan menggunakan pendekatan Cuckoo Search Algorithm (CSA). Data tersebut di antaranya meliputi jadwal kedatangan kapal, waktu berlabuh kapal di dermaga, kapasitas dan jumlah dermaga yang tersedia, estimasi waktu tunggu, serta biaya keterlambatan penyandaran kapal yang dihitung dan diasumsikan berdasarkan kebijakan operasional di PT XYZ Pelabuhan Panjang.

TABEL 1

No.	Nama Kapal
1	Bunun Justice
2	Crystal Ocean
3	Emerald Putuo
4	Ermis
5	AF
...	...
72	AZ
73	BI

Dalam perancangan sistem optimasi alokasi dermaga, dilakukan klasifikasi terhadap dermaga yang tersedia berdasarkan fungsi dan kebijakan operasional pelabuhan. Secara umum, hanya dermaga yang memenuhi kriteria tertentu seperti kesesuaian jenis muatan, panjang yang memadai, dan fleksibilitas operasional yang dipertimbangkan untuk proses pemindahan kapal. Dermaga-dermaga yang memenuhi kriteria ini digunakan sebagai kandidat dalam sistem alokasi untuk memastikan efisiensi dan kelancaran layanan kapal.

TABEL 2

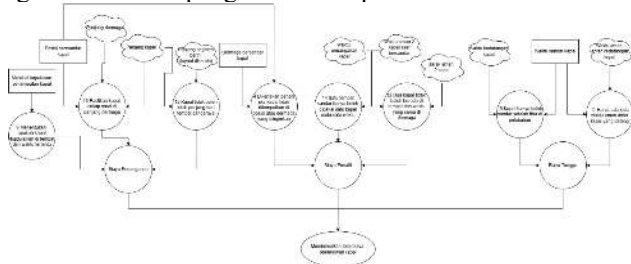
No.	Daftar Dermaga
1	Curah Kering Inter (TCK 1(d))
2	Curah Kering Inter (TCK 2(d))
3	Curah Kering Lokal (TMa)
...	...

9	Multipurpose (Tmc 1)
10	Multipurpose (Tmc 2)

Dalam perancangan sistem alokasi dermaga, diperlukan data teknis terkait karakteristik masing-masing dermaga, seperti jumlah slot aktif, panjang minimum dan maksimum kapal yang dapat dilayani (PBP MIN dan PBP MAX), serta tipe dermaga berdasarkan struktur operasionalnya. Dalam penelitian ini, enam dermaga bertipe discrete quay digunakan untuk proses penyandaran dan pemindahan kapal, masing-masing dengan satu slot aktif yang hanya dapat melayani satu kapal dalam satu waktu. Batasan panjang kapal diatur oleh parameter PBP MIN dan PBP MAX untuk memastikan kecocokan antara kapal dan dermaga. Sementara itu, dermaga yang tidak digunakan dalam proses optimasi dikeluarkan dari model karena diperuntukkan bagi operasi khusus di luar cakupan penelitian. Informasi ini menjadi komponen penting dalam parameterisasi model optimasi berbasis Cuckoo Search Algorithm, khususnya dalam pencocokan panjang kapal dan ketersediaan dermaga.

B. Influence Diagram

Setelah proses pengumpulan data dilakukan, langkah berikutnya adalah pengolahan data untuk mengonversi informasi mentah menjadi data yang dapat dianalisis dan digunakan dalam pengambilan Keputusan



GAMBAR 6

C. Model Matematis

- Total Biaya

Total biaya dalam proses penyandaran kapal dihitung berdasarkan waktu tunggu kapal yang dikalikan dengan tarif biaya tunggu. Selain itu, biaya penanganan kapal ditentukan dari waktu penanganan dikalikan dengan tarif dasar penanganan, yang kemudian disesuaikan melalui fungsi yang mempertimbangkan ukuran kapal dan posisi sandarnya. Biaya tambahan lainnya juga diperhitungkan sesuai kondisi tertentu, sehingga seluruh komponen ini digabungkan untuk menghasilkan total biaya operasional selama proses penyandaran kapal.

$$Cost(s, Q_s, BP_s, T_s^b) = T_s^w \cdot C_s^w + T_s^h \cdot [C_s^h \cdot f(s, Q_s, BP_s)] + T_s^w \cdot C_s^w$$

- Waktu Tunggu

Waktu tunggu muncul ketika kapal tidak dapat langsung berlabuh sesuai jadwal karena antrean atau keterlambatan lain. Waktu tunggu dihitung berdasarkan selisih antara waktu kedatangan kapal dan waktu aktual kapal mulai bersandar. Semakin lama waktu tunggu, semakin besar biaya yang

dikenakan, yang dihitung dengan tarif tertentu per unit waktu. Perhitungannya sebagai berikut:

$$T_s^w = T_s^b - T_s^{ea}, \quad \forall_s \in S$$

- Waktu Penanganan

Waktu ini menjelaskan total waktu dan biaya yang diperlukan untuk bongkar muat barang di kapal menggunakan crane pelabuhan. Perhitungan melibatkan jumlah muatan, jumlah crane yang digunakan, dan produktivitas crane tersebut. Biaya penanganan juga dipengaruhi oleh posisi sandar kapal, terutama jika lokasi sandar tidak sesuai dengan preferensi optimal, yang dapat meningkatkan biaya. Perhitungannya sebagai berikut:

$$T_s^h = \frac{Load_s}{N_s^{qc} \cdot HP_s^{qc}}$$

- Fungsi Penalti

Fungsi penalti diberikan sebagai konsekuensi dari alokasi lokasi sandar yang tidak optimal, yang mungkin jauh dari posisi sandar preferensi kapal atau alternatif yang diperbolehkan. Jika kapal dialokasikan ke lokasi yang tidak sesuai, biaya penalti dihitung berdasarkan jarak atau dikenakan penalti tetap. Dalam beberapa kasus, jika lokasi sandar tidak dapat melayani kapal, penalti tak hingga diberlakukan untuk memastikan skenario tersebut dihindari. Perhitungannya sebagai berikut:

$$f(s, Q_s, BP_s) = \begin{cases} |PBP_s - BP_s| \cdot C_s^{nob}, & \text{jika } Q_s = PBQ_s \\ C_s^{noq}, & \text{jika } Q_s \in ABQ_s \\ \infty, & \text{lainnya} \end{cases}$$

- Waktu Keberangkatan

Dalam proses operasional kapal di pelabuhan, ketepatan waktu keberangkatan merupakan salah satu indikator penting yang mencerminkan efisiensi pelayanan. Untuk mengukur keterlambatan keberangkatan kapal, perlu dilakukan perbandingan antara waktu aktual keberangkatan dengan waktu estimasi yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, digunakan suatu pendekatan matematis yang menggambarkan selisih antara kedua waktu tersebut guna mengetahui tingkat keterlambatan setiap kapal. Penjelasan mengenai formulasi ini disajikan sebagai berikut:

$$T_s^d = \max \{T_s^{ad} - T_s^{ed}\}, \quad \forall_s \in S$$

- Fungsi Tujuan

Dalam suatu permasalahan optimasi alokasi dermaga, diperlukan perumusan fungsi tujuan yang bertujuan

untuk meminimalkan total biaya operasional yang timbul selama proses penyandaran kapal. Fungsi ini mempertimbangkan berbagai kombinasi antara kapal, jenis dermaga, posisi sandar, dan waktu agar solusi yang dihasilkan mampu memberikan efisiensi maksimal. Secara matematis, fungsi tujuan dirumuskan sebagai berikut:

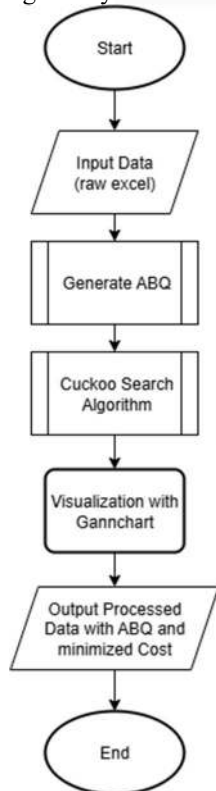
$$\text{minimize } \sum_{s \in S} \sum_{q \in Q} \sum_{b \in Bq} \sum_{t \in T} \text{Cost}(s, q, b, t) \cdot x_{sqbt}$$

D. Perhitungan *Cuckoo Search Algorithm*

Flowchart di bawah ini menggambarkan tahapan penerapan metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA) dalam optimasi alokasi dermaga. Proses diawali dengan input data kapal dan pembuatan data awal penjadwalan sandar. Sistem kemudian membangkitkan kombinasi penempatan kapal (ABQ) berdasarkan kecocokan antara kapal dan ketersediaan dermaga.

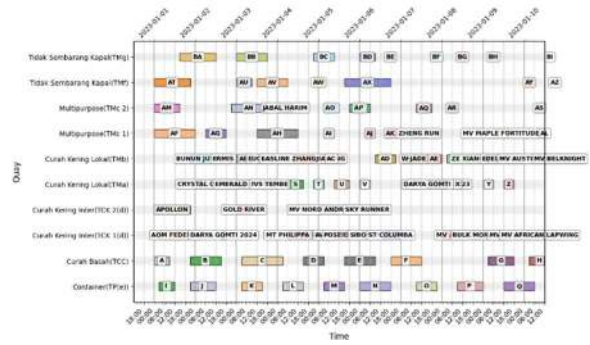
Setelah ABQ valid terbentuk, CSA dijalankan dengan inialisasi parameter seperti jumlah sarang, probabilitas penghapusan, dan jumlah iterasi. Populasi awal solusi dievaluasi berdasarkan biaya. Pada setiap iterasi, CSA menghasilkan solusi baru melalui *Levy Flight*, membandingkan dengan solusi lama, dan memperbarui jika lebih baik. Sebagian solusi terburuk dihapus secara acak untuk menjaga keragaman. Proses berulang hingga iterasi selesai.

Hasil akhir dari CSA adalah solusi terbaik berupa susunan penempatan kapal di dermaga dengan total biaya minimum serta riwayat perhitungan biaya selama iterasi.



GAMBAR 8

E. Hasil Perancangan



GAMBAR 9

Gambar di atas menunjukkan hasil visualisasi penjadwalan kapal setelah dilakukan optimasi alokasi dermaga menggunakan metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA). Terlihat bahwa penempatan kapal di masing-masing dermaga sudah lebih tertata dan merata dibandingkan kondisi saat ini sebelumnya. Tumpang tindih jadwal antar kapal berhasil diminimalkan, sehingga dermaga dapat dimanfaatkan secara lebih efisien. Selain itu, distribusi kapal pada dermaga jenis tertentu seperti multipurpose, curah kering, dan tidak sembarang kapal juga tampak lebih seimbang. Perubahan ini bertujuan untuk mengurangi waktu tunggu, menekan biaya operasional, serta meningkatkan kelancaran arus kapal di pelabuhan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan mengenai optimasi alokasi dermaga pada PT XYZ di Pelabuhan Panjang menggunakan metode *Cuckoo Search Algorithm* (CSA), dapat disimpulkan beberapa hal berikut. Permasalahan keterlambatan penyandaran kapal yang berdampak pada peningkatan biaya operasional, seperti biaya tunggu, biaya penalti, dan biaya penanganan, disebabkan oleh alokasi dermaga yang tidak optimal. Model optimasi menggunakan *Cuckoo Search Algorithm* terbukti efektif dalam menyelesaikan permasalahan alokasi dermaga secara lebih efisien. Hasil simulasi terhadap 91 kapal menunjukkan bahwa *Cuckoo Search Algorithm* mampu mengurangi waktu tunggu dan keterlambatan secara signifikan, sekaligus menekan total biaya operasional kapal.

Alokasi dermaga yang dihasilkan dari *Cuckoo Search Algorithm* memberikan penyesuaian posisi kapal yang lebih optimal berdasarkan waktu kedatangan, jenis kapal, dan kapasitas dermaga, yang menghasilkan efisiensi waktu dan biaya yang nyata. Penelitian menunjukkan bahwa target perusahaan dalam meminimalkan waktu penyandaran maksimal 60 menit dapat dicapai secara konsisten melalui pendekatan *Cuckoo Search Algorithm*, serta terdapat potensi penghematan biaya operasional secara keseluruhan.

Selain itu, metode ini mampu mengalokasikan dermaga dengan hasil minimasi waktu tunggu hingga 0% pada kapal-kapal yang sebelumnya mengalami keterlambatan. Dalam sistem saat ini, ketika sebuah kapal bersandar melebihi batas waktu 1 jam, akan dikenakan penalti tambahan karena melebihi ambang batas waktu tunggu. Apabila jumlah kapal yang terlambat semakin banyak, maka penalti waktu tunggu yang dikenakan akan semakin tinggi, sehingga meningkatkan total biaya dan menurunkan efisiensi sistem. Oleh karena itu, penerapan metode optimasi ini menjadi langkah yang tepat

dalam memperbaiki sistem alokasi dermaga agar kinerja operasional pelabuhan dapat meningkat secara menyeluruh.

REFERENSI

- [1] Adha, M. A., Supriyanto, A., & Timan, A. (2019). Strategi Peningkatan Mutu Lulusan Madrasah Menggunakan Diagram Fishbone. *Tarbawi: Jurnal Keilmuan Manajemen Pendidikan*, 5(01), 11–22.
- [2] Afrianto, M. A. (n.d.). *Manajemen Pelabuhan dan Realisasi Ekspor Impor Administrator Pelabuhan*. Universitas Brawijaya.
- [3] Agus Setiono, B. (2012). Sistem Poperasional Pelayanan Pemanduan Terhadap Keselamatan Kapal di PT. Pelabuhan Indonesia III (Persero) Cabang Tanjung Perak Surabaya.
- [4] Amanullah, L. H., Mandika, M. G. I., Hargono, S., & Salamun, S. (2018). Kajian Layanan Dan Utilitas Dermaga Terminal Peti Kemas Pelabuhan Panjang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 7(1), 109–120.
- [5] Aslam, S., Michaelides, M. P., & Herodotou, H. (2023). Berth Allocation Considering Multiple Quays: A Practical Approach Using Cuckoo Search Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1280.
- [6] Bertsimas, D., & Weismantel, R. (2005). *Optimization Over Integers*. Dynamic Ideas.
- [7] Direktorat Jenderal Perhubungan Laut. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 31 Tahun 2021 tentang Pelabuhan. Lembaran Negara Republik Indonesia.
- [8] Gandomi, A. H., Yang, X. S., & Alavi, A. H. (2013). Cuckoo Search Algorithm: A Metaheuristic Approach to Solve Structural Optimization Problems. *Eng. Comput*, 29, 17–35.
- [9] Hidayat, R. (2022). Analisis Proses Penyandaran Kapal di Pelabuhan: Tantangan dan Solusi. *Jurnal Ilmu Pelabuhan Dan Maritim*, 7(1), 15–28.
- [10] Kadioğlu, S. O., Esmer, S., & Yorulmaz, M. (2024). A Study on the Effect of Waiting Time of Ships at Anchor on Efficiency Measurement in Ports. *İşletme Bilimi Dergisi*, 12(2), 185–195.
- [11] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2018). Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 25 Tahun 2018 tentang Penyelenggaraan Pelayanan Kapal di Pelabuhan. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- [12] Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2015). Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor Pm 51 Tahun 2015 Tentang Penyelenggaraan Pelabuhan Laut.
- [13] Li, X., & Wang, Z. (2022). Impact of Berth Allocation on Ship Waiting Time and Departure Delay in Ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 159, 102568.
- [14] Mardjono, A. (2015). *Pengantar Ilmu Pelayaran*. Maritim.
- [15] Notodihardjo, S. (2020). Efisiensi Proses Bongkar Muat di Pelabuhan: Faktor-Faktor yang Mempengaruhi. *Jurnal Transportasi Dan Logistik*, 5(2), 45–58.
- [16] Notteboom, T., & Rodrigue, J. P. (2020). The Geography of Transport Systems (5th ed.). Routledge.
- [17] Prabowo, A. (2021). Peran Pemanduan Kapal dalam Meningkatkan Keselamatan dan Efisiensi Operasional Pelabuhan. *Jurnal Maritim Dan Transportasi*, 6(1), 30–42.
- [18] Pratama, A. S., & Widyastuti, D. (2020). Analisis Kinerja Pelabuhan Pengumpan di Jawa Timur. *Jurnal Transportasi Indonesia*, 12(2), 123–135.
- [19] Presiden Republik Indonesia. (2008). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 Tentang Pelayaran.
- [20] Presiden Republik Ineonesia. (2016). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2009 tentang Kepelabuhanan. In Tersedia pada <http://pkps.bappenas.go.id/dokumen/uu/Uu%20Sektor/Pelayaran/PP> (Vol. 2061).
- [21] Quist, P., Lansen, A. J., Koedijk, O. C., Verheij, H. J., van Koningsveld, M., & de Vriend, H. J. (2021). Part II - Ch 5 Other terminal types. In M. V. Koningsveld, H. J. Verheij, P. Taneja, & H. J. de Vriend (Eds.), *Ports and Waterways: Navigating a changing world* (pp. 161-191). TU Delft OPEN Publishing.
- [22] Romadhon, Y. (2018). Optimalisasi Pelabuhan Tanjung Priok menuju pelabuhan berkelas dunia. *Jurnal Logistik Indonesia*, 2(1), 37–43.
- [23] Santoso, B. (2020). Manajemen Kedatangan Kapal di Pelabuhan: Tantangan dan Solusi. *Jurnal Ilmu Pelabuhan Dan Maritim*, 5(2), 45–60.
- [24] Sari, R. A. (2019). Kapal sebagai Alat Transportasi: Fungsi dan Peran dalam Perdagangan Internasional. *Jurnal Transportasi Maritim*, 4(1), 23–35.
- [25] Sari, R. D. A. K., & Sodikin, M. (2023). Proses Penanganan Kedatangan Dan Keberangkatan Kapal Mv Manalagi Enzi Oleh Pt Samudera Makmur Agensi Cabang Cilacap. *MUARA: Jurnal Manajemen Pelayaran Nasional*, 6(1).
- [26] Shahpanah, A., Poursafary, S., Shariatmadari, S., Gholamkhasi, A., & Zahraee, S. M. (2014). Optimization Waiting Time at Berthing Area of Port Container Terminal with Hybrid Genetic Algorithm (GA) and Artificial Neural Network (ANN). *Advanced Materials Research*, 902, 431–436.
- [27] Slameto, S. (2016). The Application of Fishbone Diagram Analisis to Improve School Quality. *Dinamika Ilmu*, 16(1), 59–74.
- [28] Supriyadi, A., & Rahardjo, B. (2021). Manajemen Waktu dalam Proses Keberangkatan Kapal di Pelabuhan: Studi Kasus Pelabuhan Tanjung Priok. *Jurnal Transportasi Dan Logistik*, 6(1), 15–30.
- [29] Suryantoro, B., Punama, D. W., & Haqi, M. (2020). Tenaga Kerja, Peralatan Bongkar Muat Lift On/Off, Dan Efektivitas Lapangan Penumpukan Terhadap Produktivitas Bongkar Muat Peti KEMAS. *Jurnal Baruna Horizon*, 3(1), 156–169.
- [30] Tijan, E., Jović, M., Panjako, A., & Žgaljić, D. (2021). The role of port authority in port governance and port community system implementation. *Sustainability*, 13(5), 2795.
- [31] Tjahjono, B. (2018). *Transportasi Laut*. Graha Ilmu.
- [32] Vanderbeck, F., & Wolsey, L. A. (2015). *Mixed Integer Programming: A Survey*. *European Journal of Operational Research*, 246(1), 1–15.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.001>

- [33] Wibowo, S., Santosa, P. I., & Nugroho, Y. (2022). Improving Operational Efficiency at Container Terminals using Fishbone Diagram: A Case Study in Indonesia. *Maritime Economics & Logistics*, 24(2),

156–171.

- [34] Yang, X. S., & Deb, S. (2009). Cuckoo Search via Lévy Flights. *Proceedings of the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, 210–214.

